

工业技术

可渗透反应墙耦合抽出-注入水力控制技术 在石化污染场地地下水修复中的应用

周慧娣^{1,2}, 杨昱¹, 徐祥健¹, 邓圣¹, 夏甫¹, 韩旭¹, 肖瀚^{1*}, 姜永海¹

(1. 中国环境科学研究院国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室, 北京 100012;
2. 天津科技大学海洋与环境学院, 滨海地下水利用与保护研究室, 天津 300457)

摘要: 选择可渗透反应墙 (PRB) 耦合抽出-注入水力控制技术对地下水进行修复, 利用 GMS 软件 MODFLOW 和 MT3DMS 模块建立假设场地的水流模型以及污染物的溶质运移模型, 基于该技术修复效果的关键影响因素 (地下水水动力条件、水文地质条件和修复材料污染物去除性能) 设置不同情景, 对比分析不同情景的模拟结果, 通过数据分析拟合推导出污染物去除率 r 与抽出-注入量 Q 、含水层渗透系数 K 、污染物去除效率 η 之间的定量关系表达式, 指导该技术在实地应用时的关键参数设置。以山东某石化污染场地为例进行对比实验, 发现修复 2 a 后耦合修复技术和单一修复技术的污染物去除率分别为 75.2% ~ 80.1% 和 12.9% ~ 14.7%, 表明耦合修复技术在渗透性较差、水力梯度较小的污染场地修复效果明显好于单一修复技术。

关键词: 石化污染场地; 污染地下水修复; PRB 耦合抽出-注入水力控制技术; 修复效果; 影响因素

中图分类号: X523; X53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)01-0225-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.01.039

Application of permeable reaction barrier coupled pumping-recharge hydraulic control technology upon groundwater remediation in petrochemical contaminated sites

ZHOU Hui-di^{1,2}, YANG Yu¹, XU Xiang-jian¹, DENG Sheng¹, XIA Fu¹, HAN Xu¹,
XIAO Han^{1*}, JIANG Yong-hai¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory for Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Laboratory of Coastal Groundwater Utilization and Protection, School of Ocean and Environment, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Permeable reaction barrier (PRB) coupled pumping-recharge hydraulic control technology is selected to remediate the polluted groundwater. MODFLOW and MT3DMS modules of GMS software are employed to establish the groundwater flow model and solute transport model of pollutants in a hypothetical contaminated site, while different scenarios are set according to the key influencing factors for the remediation effect of this technology, including groundwater hydrodynamic conditions, hydrogeological conditions and pollutant removal characteristics of remediation materials. Based on comparisons of various scenarios' simulation results and data analysis, the quantitative relationship expressions among pollutant removal rate r , pumping-recharge quantity Q , aquifer hydraulic conductivity K and pollutant removal efficiency η are derived, which can be used to guide the key parameter setting of the technology when applying to actual contaminated site. Taking an actual petrochemical contaminated site in Shandong province, China as an example, simulation results indicate that after 2 years of remediation, the removal rates of pollutants by the coupling remediation technology and the single PRB remediation technology are 75.2% - 80.1% and 12.9% - 14.7%, respectively, demonstrating that the remediation performance of the coupling remediation technology is much better than that of single PRB remediation technology in the contaminated site with poor permeability and small hydraulic gradient.

Key words: petrochemical contaminated sites; remediation of contaminated groundwater; PRB coupled pumping and recharge hydraulic control technology; remediation effect; influencing factor

我国石化污染场地多具有多源复合、持久、毒性大的污染特征, 严重危害地下水环境和人类健康, 污染地下水修复问题已引起广泛关注; 华北、西北、东

北以及华南等地区的石化污染场地目前最主要应用监测自然衰减技术、植物修复技术、生物可渗透反应墙技术以及淋洗-抽提技术进行修复^[1-4]。Chung

收稿日期: 2024-04-02; 修回日期: 2024-11-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1806202); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2023YYSKY-30)

作者简介: 周慧娣 (1998-), 女, 硕士生, 研究方向为地下水污染模拟, huiditj@163.com; 肖瀚 (1989-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为地下水流和溶质运移模拟, 通讯联系人, hxiao0716@163.com。

等^[5]发现 PRB 技术适用于石化污染地下水的修复; Guerin 等^[6]在实际监测中验证了 MODFLOW、MT3D 对 PRB 去除效果模拟结果的准确性; Saadatpour 等^[7]证明 PRB 反应材料的反应系数对污染物去除效果的影响大于 PRB 宽度和 PRB 渗透系数。根据文献调研,我国 60% 以上的石化污染场地土壤类型为渗透性较低的黏土、粉质黏土和粉土^[8],但实践证明,PRB 对于渗透性较差、水力梯度较小的含水层存在修复时间长、修复效果一般等瓶颈问题^[9-12]。PRB 技术与抽出-注入水力控制技术耦合,可人为改变含水层的水动力条件,加快地下水循环,缩短修复时间,提高修复效果^[9]。该耦合修复技术修复效果的影响因素主要包括地下水水动力条件、水文地质条件和 PRB 污染物去除性能^[13-15],然而关于这一方面的研究成果相对较少。

本研究推导了污染物去除率与关键参数之间的定量关系表达式并采用数值模拟方法模拟该技术在污染场地应用时的污染物去除效果,并与 PRB 单一修复技术污染物去除效果进行对比,明确 PRB 耦合抽出-注入水力控制技术与 PRB 单一修复技术在渗透性较差、水力梯度较小的污染场地应用的差异。研究成果可以为 PRB 耦合抽出-注入水力控制技术在污染场地的合理设计和高效运行提供重要参考。

1 PRB 耦合抽出-注入水力控制技术简介

PRB 耦合抽出-注入水力控制技术(以下简称“耦合修复技术”)由 PRB 单元、抽出-注入水力控制单元和地面水处理反应单元 3 部分构成,技术示意图如图 1 所示。

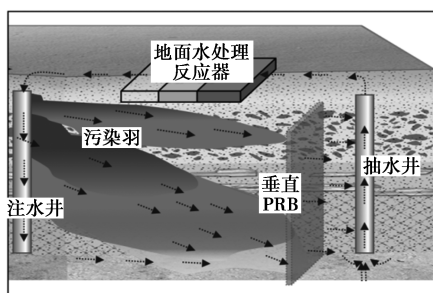


图 1 研究区技术设置示意图

该技术通常将 PRB 单元布设于污染羽下游边界处,在地下水流的作用下,污染物首先经过 PRB 吸附降解,未被吸附降解的污染物随地下水流继续向下游迁移,被布设于 PRB 下游的抽水井捕获抽出后,通过管道输送至布设于污染羽上游的注水井回注淋洗包气带和含水层,残余污染物在地下水流的

作用下,再次经过 PRB 吸附降解,以此往复循环至实现修复目标。为有效降低进入包气带和含水层的水中污染物含量,在抽出-注入水力控制单元中加入地面水处理反应单元,在回注淋洗包气带和含水层之前进一步吸附降解抽水井抽出的地下水。

2 关键因素对耦合修复技术污染物去除率的影响

影响耦合修复技术修复效果的关键因素包括含水层水文地质条件(含水层渗透系数 K)、抽出-注入水动力条件(抽注井的抽注量 Q)、PRB 污染物去除效率 η_v 和地面水处理反应器污染物去除效率 η_h [其中 PRB 和地面水处理反应器污染物去除总效率 $\eta = 1 - (1 - \eta_v) \times (1 - \eta_h)$]^[16],为探究关键因素对耦合修复技术污染物去除率的影响,基于 GMS 模拟软件的 MODFLOW 和 MT3DMS 模块,构建假想污染场地地下水流和溶质运移模型,基于 K 、 Q 、 η 设置 189 种模拟情景,根据不同情景的数值模拟结果,定量分析污染物去除率与 K 、 Q 、 η 之间的关系。

2.1 假想场地模型构建

2.1.1 模拟软件简介

GMS 是地下水模型系统 (groundwater modeling systems) 的简称,是美国 Brigham Young University 环境模型研究实验室和美国陆军排水工程实验工作站联合开发的用于地下水模拟的图形界面软件,具有良好的操作界面和优良的三维可视化效果^[17-19]。本研究利用 GMS 软件的 MODFLOW 和 MT3DMS 模块建立地下水流模型和污染物运移模型。

2.1.2 场地概化和边界条件及水文地质参数设置

模拟区为 58 m×28 m 的矩形假想场地,模拟含水层为潜水含水层,厚度为 20 m。地下水流假设为稳定流,模拟过程中水力梯度不变(假设为 0.25%),地下水流向由西向东(西侧边界接受地表水体侧向补给,东侧边界向地表水体排泄)。模拟区东、西边界设定为定水头边界(水头值分别假设为 10.000、10.145 m),南、北边界和底界设定为零流量边界,顶界设定为定流量边界,如图 2 所示。

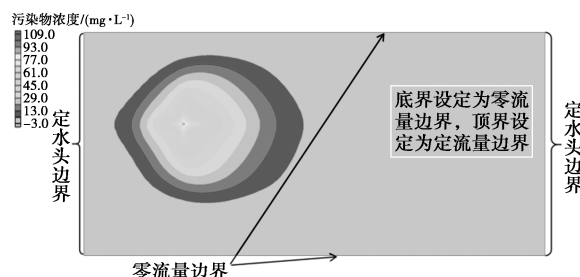


图 2 假想场地的边界条件

PRB 污染物去除效率通过网格的化学反应系数设置,地面水处理反应器去除效率通过注水井进水浓度设置。假想场地的水文地质参数设置、PRB 和抽出/注入井的参数设置详见表 1^[20-21]。

表 1 模型参数设置

参数	数值	备注
含水层水文地质参数		
渗透系数/(m·d ⁻¹)	1×10 ⁻⁴ ~1	
孔隙度	0.3	
纵向弥散度/m	10	
横向弥散度/m	1	
垂向弥散度/m	0.1	
PRB 参数		
宽度/m	28	
厚度/m	1	
深度/m	20	
渗透系数/(m·d ⁻¹)	1~10	含水层渗透系数 10 倍
抽-注井参数		
井深/m	20	抽水完整井、注水完整井
井径/m	0.5	
位置	上游注水, 下游抽水	

2.1.3 时空离散

潜水含水层水平方向剖分为 58 行 28 列的 1 m×1 m 正方形网格,垂向剖分为 20 层,每层厚度为 1 m。模拟期共计 3 a,划分为 36 个应力期(1 个月为 1 个应力期),时间步长为 1 d。

2.1.4 污染羽范围刻画

石化污染场地特征污染物主要为非水相液体(NAPLs),包括密度比水小、位于含水层顶部的轻质非水相液体(LNAPLs)和密度比水大、位于含水层底部的重质非水相液体(DNAPLs)^[22-23],由于溶解度低,即使对污染源实施源头控制(停止泄漏),赋存于含水层顶部的 LNAPLs 和赋存于含水层底部的 DNAPLs 仍会持续缓慢释放污染物,因此含水层顶部及底部各设置一个持续性点源污染源,污染羽的范围由自然状态下(即未设置 PRB 和抽注井时)点源污染源持续释放 10 a 后污染羽的空间分布特征确定(假设污染物浓度超过 4 g/L 的区域为污染羽范围)如图 2 所示。

2.2 情景设置

基于抽注水量 Q ,渗透系数 K ,PRB 去除效率 η_r 和地面水处理反应器去除效率 η_h 设置 189 种模拟情景,详见表 2。

表 2 情景设置

$K/(m \cdot d^{-1})$	$Q_{单}/(m^3 \cdot d^{-1})$	井数/个	$Q/(m^3 \cdot d^{-1})$	η_v	η_h	η
1×10 ⁻⁴	0.6	7	4.2	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
1×10 ⁻⁴	0.7	7	4.9	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
1×10 ⁻⁴	0.9	7	6.3	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
1×10 ⁻³	0.8	5	4.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
1×10 ⁻³	1.0	5	5.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
1×10 ⁻³	1.2	5	6.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
0.01	1.2	3	4.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
0.01	1.6	3	5.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
0.01	2.0	3	6.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
0.1	2.0	2	4.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
0.1	2.5	2	5.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
0.1	3.0	2	6.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
0.2	1.0	1	1.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
0.2	4.0	1	4.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
0.5	1.0	1	1.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
0.5	4.0	1	4.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
0.5	12.0	1	12.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
1	1.0	1	1.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
1	4.0	1	4.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
1	12.0	1	12.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99
1	25.0	1	25.0	0.7,0.8,0.9	0.7,0.8,0.9	0.91,0.94,0.96,0.97,0.98,0.99

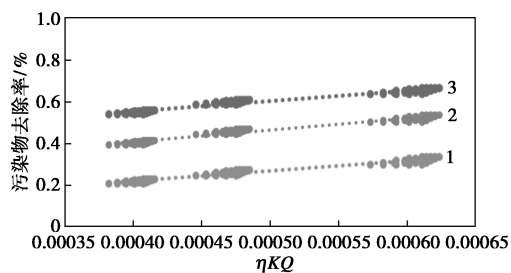
注: $Q_{单}$ 为单井抽注水量; η 为耦合修复技术污染物去除总效率, $\eta=1-(1-\eta_v) \times (1-\eta_h)$ 。

2.3 模拟结果分析

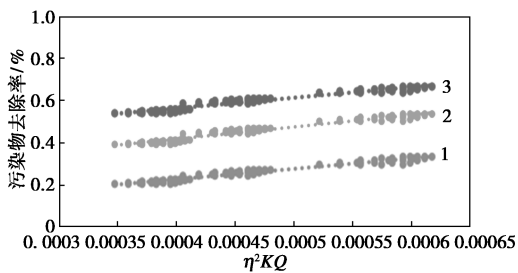
通过 189 种不同情景模拟结果的数据分析拟合

(如图 3 所示),获取渗透系数 K 在 $1 \times 10^{-4} \sim 1$ m/d 范围不同修复时间内含水层污染物去除率 r 与含水

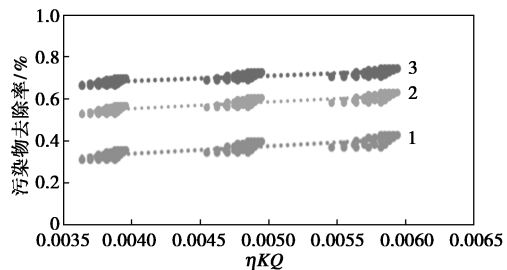
层渗透系数 K 、抽注水量 Q 、PRB 和地面水处理反应器污染物总去除效率 η 之间的定量关系, 详见表 3。发现 r 与 ηKQ 之间呈线性关系, 拟合系数 R^2 在 0.8~0.9 范围内; r 与 $\eta^2 KQ$ 之间呈线性关系, 拟合系数 R^2 在 0.8~0.9 范围内。定量关系表达式的提出, 可以为耦合修复技术应用于实际污染场地修复时的工艺参数选择提供重要参考。



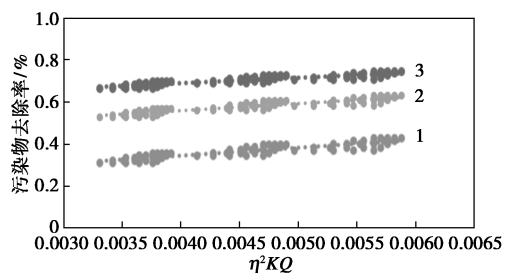
(a) $K: 10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m/d}$



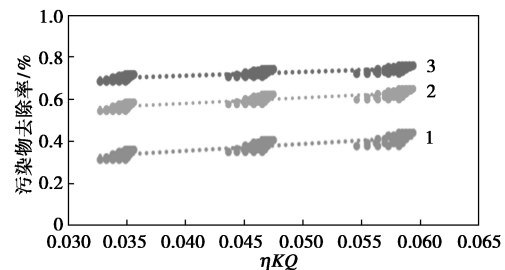
(b) $K: 10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m/d}$



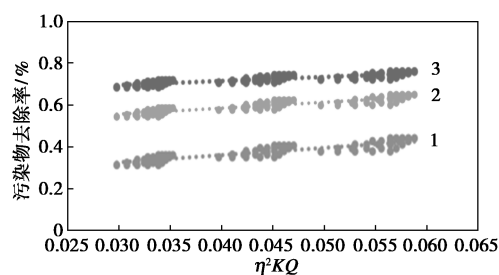
(c) $K: 10^{-3} \sim 0.01 \text{ m/d}$



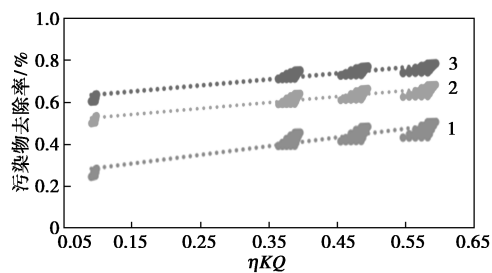
(d) $K: 10^{-3} \sim 0.01 \text{ m/d}$



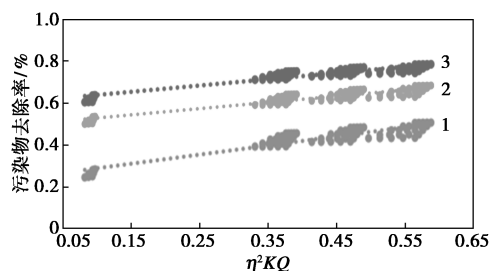
(e) $K: 0.01 \sim 0.1 \text{ m/d}$



(f) $K: 0.01 \sim 0.1 \text{ m/d}$



(g) $K: 0.1 \sim 1 \text{ m/d}$



(h) $K: 0.1 \sim 1 \text{ m/d}$

1—修复 1 a; 2—修复 1 a; 3—修复 3 a

图 3 基于模拟结果数据拟合的 r 与 K 、 Q 、 η 之间的定量关系

表 3 基于模拟结果数据拟合的不同情景下 r 和 K 、 Q 拟合关系表达式

$K/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	类别	修复时间/a	定量关系表达式
$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	表达式 1	1	$r = 485.51\eta KQ + 0.0250$
		2	$r = 561.61\eta KQ + 0.1826$
		3	$r = 492.33\eta KQ + 0.3565$
	表达式 2	1	$r = 493.36\eta^2 KQ + 0.0307$
		2	$r = 568.32\eta^2 KQ + 0.1904$
		3	$r = 498.13\eta^2 KQ + 0.3633$
$1 \times 10^{-3} \sim 0.01$	表达式 1	1	$r = 35.687\eta KQ + 0.1962$
		2	$r = 31.676\eta KQ + 0.4261$
		3	$r = 24.319\eta KQ + 0.5868$
	表达式 2	1	$r = 37.467\eta^2 KQ + 0.1948$
		2	$r = 33.204\eta^2 KQ + 0.4251$
		3	$r = 25.549\eta^2 KQ + 0.5857$
$0.01 \sim 0.1$	表达式 1	1	$r = 3.2752\eta KQ + 0.2235$
		2	$r = 2.6715\eta KQ + 0.4723$
		3	$r = 1.8017\eta KQ + 0.6383$

续表

$K/(m \cdot d^{-1})$	类别	修复时间/a	定量关系表达式
	表达式 2	1	$r = 3.4540\eta^2 KQ + 0.2216$
		2	$r = 2.8212\eta^2 KQ + 0.4706$
		3	$r = 1.9133\eta^2 KQ + 0.6367$
0.1~1	表达式 1	1	$r = 0.4143\eta KQ + 0.2460$
		2	$r = 0.2831\eta KQ + 0.4988$
		3	$r = 0.2871\eta KQ + 0.6073$
	表达式 2	1	$r = 0.4335\eta^2 KQ + 0.2451$
		2	$r = 0.2971\eta^2 KQ + 0.4978$
		3	$r = 0.2996\eta^2 KQ + 0.6070$

3 耦合修复技术在实际污染场地的应用

3.1 研究区概况

3.1.1 场地基本信息

实际场地位于山东省淄博市某石化污染场地,该场地包括 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 5 个待修复地块,其中 A_0 、 A_1 、 A_3 和 A_4 地块地面有厂区道路和异位热脱附设备,地下存在较多燃气管道和供水供电线路,耦合修复技术实施难度较大,而 A_2 地块地面无道路、围墙和设备,地下无燃气管道和供水供电线路,且地块内现有 2 眼观测井有监测数据,所以选取 A_2 地块作为研究区(如图 4 所示), A_2 地块面积约为 $800 m^2$,周长约为 $145 m$ 。位于山前冲积平原,地形平坦,地表完整,土层岩性均一。研究区所在区域属暖温带半湿润季风型大陆性气候,全年降雨量约为 $600 mm$,年平均气温为 $12.3 \sim 13.1^\circ C$,无河流水塘等地表水体。

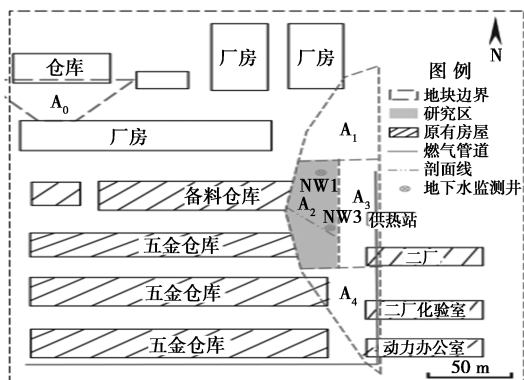


图 4 研究区位置图

3.1.2 水文地质条件

根据前期钻探资料揭示的 $12 m$ 深度范围内地层情况,地层自上而下划分为杂填土、粉质黏土、粉土、粉质黏土 4 层(如图 5 所示), $12 m$ 深度以下为渗透性很差的黏土层。地下水稳定水位埋深为自然

地表下 $2.2 \sim 2.45 m$,平均为 $2.35 m$,相应标高为 $40.11 \sim 40.37 m$,平均为 $40.24 m$,平均水力梯度约为 5‰ 。

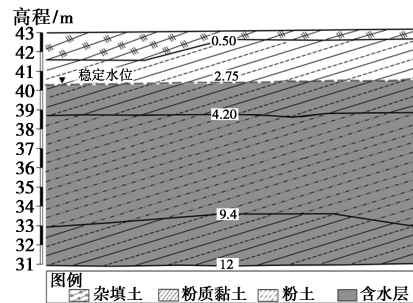


图 5 水文地质剖面图

3.1.3 污染特征与修复目标

根据前期场调报告,研究区内地下水中的特征污染物为苯和氯乙烯,苯的浓度为 $242 \sim 9\ 180 \mu g/L$ [如图 6(a)所示],氯乙烯的浓度为 $1\ 130 \sim 3\ 100 \mu g/L$ [如图 6(b)所示],根据场地修复实施方案的要求,修复时间为 $2 a$,修复后苯的浓度不得超过 $2\ 611 \mu g/L$,氯乙烯的浓度不得超过 $787 \mu g/L$ 。目前场地内苯的最大值超标 3.516 倍,氯乙烯的浓度超标 3.939 倍。

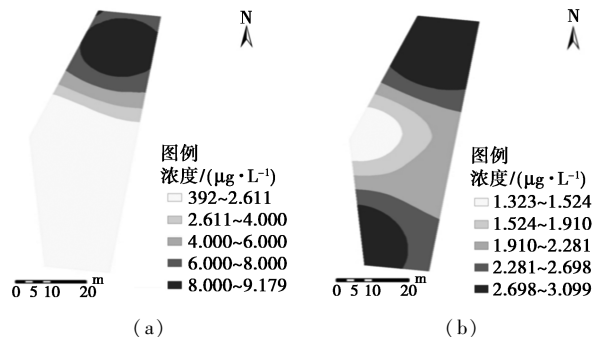


图 6 苯和氯乙烯的浓度分布图

3.2 模型建立

3.2.1 时空离散

潜水含水层水平方向剖分为 67 行 34 列的 $1 m \times 1 m$ 正方形网格,垂向剖分为 3 层(上层为粉质黏土层,中层为粉土层,下层为粉质黏土层),各层顶底板标高根据前期场调报告中的高程离散点数据插值确定。

3.2.2 初始和边界条件

研究区侧向边界设置为通用水头边界(第 III 类边界条件),顶部边界设置为开放边界,接受降水入渗补给并通过蒸发排泄,因 $12 m$ 以下为渗透性很差的不透水黏土层,底部边界设置为零流量边界(第 II 类边界条件)。

3.2.3 水文地质参数

根据前期场调报告,第一层(粉质黏土层)渗透系数设定为 0.006 m/d,第二层(粉土层)渗透系数 0.05 m/d,第三层(粉质黏土层)渗透系数 0.006 m/d;各层孔隙度均设定为 0.3;各层纵向弥散度、横向弥散度和垂向弥散度均设定为 10、1、0.1 m。

3.2.4 源汇项

源汇项主要包括降雨入渗、蒸发以及侧向径流。侧向流入量和侧向流出量通过模型侧向通用水头边界处理;根据前期场报告,研究区年均降雨量为 600 mm,降水入渗系数设定为 0.1,年均蒸发量约为 1 200 mm,极限蒸发深度设定为 4 m。

3.2.5 模型校准

根据前期场调报告中的等水位线图进行模型校正,微调各层渗透系数的值,每次参数调整后重新运行模型直至模拟等水位线与场调报告中的等水位线较为一致(如图 7 所示)。

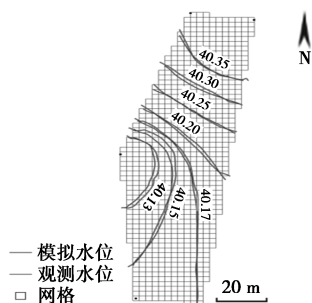


图 7 模拟流场与实际流场对比

模型校准后,地下水流场模拟结果见图 8(a)。苯的溶质运移模拟结果见图 8(b),模拟区北部苯含量超过筛选值(2 611 $\mu\text{g}/\text{L}$),氯乙烯的溶质运移模拟结果见图 8(c),模拟区全区氯乙烯含量均超过筛选值(787 $\mu\text{g}/\text{L}$)。

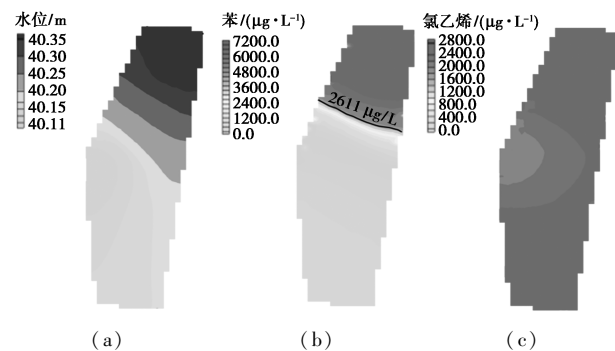


图 8 地下水流场及污染物浓度分布模拟图

3.2.6 耦合修复技术参数设置

影响耦合修复技术污染物去除率的关键参数主要包括含水层渗透系数 K 、抽出-注入水量 Q 以及

技术总去除效率 η 。含水层渗透系数 K 已在地下水流和溶质运移模型中设置,而抽出-注入水量 Q 以及技术去除效率 η 可以根据表 3 中的定量关系表达式计算结果加以设置。研究区的修复目标是 2 a 内将苯和氯乙烯浓度降至筛选值以内,经计算,污染物去除率 r 至少需要达到 75%,根据表 3 中的定量关系表达式 $r=31.676\eta KQ+0.4261$ 和 $r=33.204\eta^2 KQ+0.4251$,计算得到耦合修复技术总去除效率 η 为 0.954,抽注量 Q 为 18.13 m^3/d ,在此基础上,根据 η 与 η_v 、 η_h 的关系,确定了 7 种 η_v 、 η_h 的情景,详见表 4。在已构建的地下水流和溶质运移模型中加入技术参数。PRB 布设于污染羽下游,抽水井布设于污染羽下游,注水井布设于污染羽上游。PRB 和抽水井的具体布设方式如图 9 所示。

表 4 情景设置

情景	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	η	$\eta_v/\%$	$\eta_h/\%$
情景 1			0.60	0.89
情景 2			0.65	0.87
情景 3			0.70	0.85
情景 4	18.13	0.954	0.75	0.82
情景 5			0.80	0.77
情景 6			0.85	0.69
情景 7			0.90	0.54

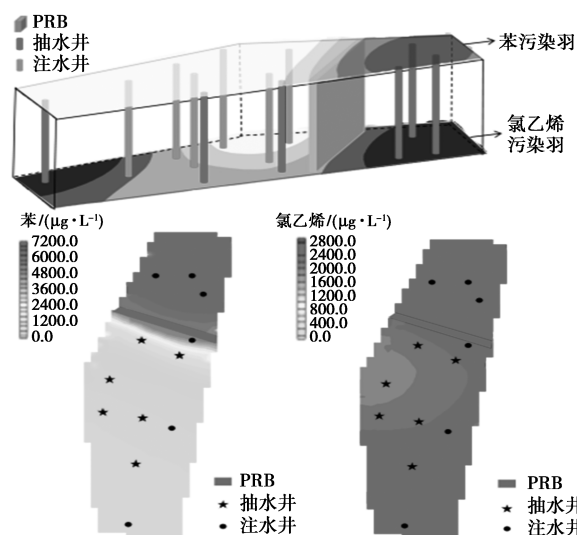


图 9 PRB 和抽注水井具体布设方式

3.3 模拟结果分析

7 种情景的模拟结果详见表 5,发现采用耦合修复技术修复 2 a 后,污染物去除率均达到 75% 以上,超过修复目标值 75%,其中情景 1 的污染物去除率最高,达到 80.1%。情景 1 修复前和修复后苯和氯乙烯的浓度变化如图 7(b)、7(c)和图 10 所示,可以看出,苯和氯乙烯污染羽的面积大幅度减小。

表 5 7 种情景的模拟结果

情景	初始污染物 总量/g	修复 2 a 后污染物 总量/g	污染物 去除率/%
情景 1		1059	80.1
情景 2		1073	79.8
情景 3		1089	79.4
情景 4	5309	1115	78.9
情景 5		1158	78.0
情景 6		1229	76.8
情景 7		1323	75.2

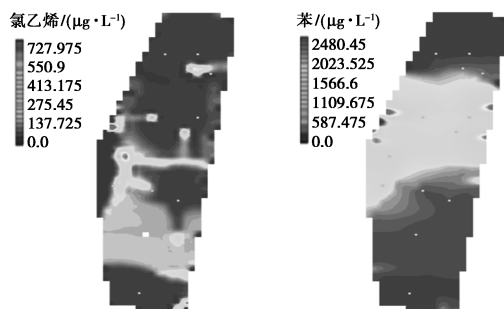


图 10 情景一苯和氯乙烯 2 a 修复效果模拟图

为探究耦合修复技术与 PRB 单一修复技术污染物去除效果的差异,将模型中的抽出-注入模块和地面水处理反应器模块移除,仅保留 PRB 模块,模拟 7 种情景下污染物去除效果,详见表 6。可以看出,与 PRB 单一修复技术相比,耦合修复技术的修复效率可以提高 4.1~5.2 倍。

表 6 污染物去除率对比

PRB 单一修复技术		耦合修复技术		污染物	
η_v /%	污染物 去除率/%	η_v /%	η_h /%	污染物 去除率/%	去除率 提高倍数
60	12.9	60	0.89	80.1	5.2
65	13.3	65	0.87	79.8	5.0
70	13.6	70	0.85	79.4	4.8
75	13.9	75	0.82	78.9	4.7
80	14.2	80	0.77	78.0	4.5
85	14.4	85	0.69	76.8	4.3
90	14.7	90	0.54	75.2	4.1

4 结论

(1) PRB 耦合抽出-注入水力控制技术修复效果的关键影响因素包括地下水水动力条件、水文地质条件和修复材料污染物去除性能,污染物去除率 r 与抽出-注入量 Q 、含水层渗透系数 K 、污染物去除效率 η 之间存在的定量关系可用于指导该耦合技术在实际污染场地应用时的关键参数设置。

(2) 与 PRB 单一修复技术相比,PRB 耦合抽出-注入水力控制技术针对渗透性差、水力梯度小

的含水层可以取得较好的修复效果。实际污染场地的模拟结果显示,耦合修复技术污染物去除率比单一修复技术提高 4.1~5.2 倍。

参考文献

- [1] 蔡婧怡,陈宗宇,蔡五田,等.某石化污染场地含水层自然降解 BTEX 能力评估[J].现代地质,2015,29(2):383-389.
- [2] 宋曦,王金成,井明博,等.紫花苜蓿对陇东黄土高原石油土壤场地生态修复的综合响应[J].草业科学,2019,36(7):1754-1764.
- [3] 刘虹.原位修复石油烃污染地下水的 PRB 技术及长效性研究[D].长春:吉林大学,2012:1-145.
- [4] 陈思莉,易仲源,王骥,等.淋洗-抽提技术修复柴油污染土壤及地下水案例分析[J].环境工程,2020,38(1):178-182.
- [5] Chung Y W, Kim J, Kong S H. Performance prediction of permeable reactive barriers by three-dimensional groundwater flow simulation [J]. International Journal of Environmental Science and Development, 2011, 2(2): 138-141.
- [6] Guerin T F, Horner S, Mcgovern T, et al. An application of permeable reactive barrier technology to petroleum hydrocarbon contaminated groundwater [J]. Water Research, 2002, 36(1): 15-24.
- [7] Saadatpour M, Goeni M, Afshar A, et al. A preliminary approach based on numerical simulation modelling and evaluation of permeable reactive barrier for aquifer remediation susceptible to selenium contaminant [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 331: 117242.
- [8] 田雷,胡立堂,张梦琳.低渗透石化污染场地多相抽提修复效率的数值模拟[J].中国环境科学,2022,42(2):925-935.
- [9] Bekele D N, Du J, De Freitas L G, et al. Actively facilitated permeable reactive barrier for remediation of TCE from a low permeability aquifer: Field application [J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 592-602.
- [10] 刘翔,唐翠梅,陆兆华,等.零价铁 PRB 技术在地下水原位修复中的研究进展[J].环境科学研究,2013,26(12):1309-1315.
- [11] 罗育池,李传生.PRB 技术及其在地下水污染修复中的应用[J].安徽农业科学,2007,(27):8656-8657,8660.
- [12] Obiri-nyarko F, Grajales-mera S J, Malina G. An overview of permeable reactive barriers for in situ sustainable groundwater remediation [J]. Chemosphere, 2014, 111: 243-59.
- [13] 代朝猛,张峻博,李彦,等.污染场地地下水修复技术研究进展[J].水处理技术,2022,48(8):1-6,13.
- [14] 邓一荣,林挺,肖荣波,等.EKR-PRB 耦合技术在污染场地修复中的应用研究进展[J].环境工程,2015,33(10):152-157.
- [15] 王平,韩占涛,张海领,等.某氨氮污染地下水水体抽出-处理系统优化模拟研究[J].水文地质工程地质,2020,47(3):34-43.
- [16] 吴永明,邓利智,余郭龙,等.多级 A/O-SBBR 生化工艺耦合生态净化系统处理猪场沼液的工程应用[J].水处理技术,2022,48(7):153-156.
- [17] Doble R C, Pickett T, Crosbie R S, et al. Emulation of recharge and evapotranspiration processes in shallow groundwater systems [J]. Journal of Hydrology, 2017, 555: 894-908.
- [18] Xu Y, Shao J Y. Application of groundwater modeling systems to the evaluation of groundwater resources in the Yinchuan Plain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 7-12.
- [19] Chen Z, Huang J, Zhan H, et al. Optimization schemes for deep foundation pit dewatering under complicated hydrogeological conditions using MODFLOW-USG [J]. Engineering Geology, 2022, 303: 106653.
- [20] 刘景兰,李立伟,朱明奕,等.基于 GMS 的某典型石化园区地下水污染运移研究[J].能源与环保,2022,44(5):7-12.
- [21] 郑凯旋,黄俊龙,罗兴申,等.数值模拟在可渗透反应墙设计中的应用研究进展[J].环境工程,2022,40(6):22-30.
- [22] Mineo S. Groundwater and soil contamination by LNAPL: State of the art and future challenges [J]. Science of The Total Environment, 2023, 874: 162394.
- [23] Yang C, Liu F, Zhang C, et al. Density-modification displacement using colloidal biliquid aphron for entrapped DNAPL contaminated aquifer remediation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 432: 128641. ■